

文章编号: 0253-2239(2010)01-0036-07

基于菲涅耳波带片的光通信天线

方靖岳 常胜利 秦石乔 张海良

(国防科学技术大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 利用平面屏幕衍射的基尔霍夫理论, 模拟计算了波带片在平面光垂直入射情况下的会聚及分光性能。结果表明, 菲涅耳波带片(FZP)对垂直入射的平行光具有会聚及分光能力; 离轴波带片相对于相同面积的对称波带片对参考光波的聚集能力更强, 能获得更加干净的背景。ZEMAX 分析表明, 偏离中心一定位置的离轴波带片的面积越大, 对光波的聚集能力越强, 抑噪能力也越强; 面积一定的离轴波带片偏离对称波带片中心越小, 对光波的聚集能力越强, 抑噪能力也越强。提出了利用菲涅耳波带片及卡塞格伦望远镜相结合的组合天线方案, 分析表明, 该天线具有一定的聚光能力, 且抑噪能力相比抛物面天线更强。

关键词 光通信; 光学天线; 菲涅耳波带片; 卡塞格伦望远镜; 离轴波带片

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103001.0036

Optical Communication Antenna Based on Fresnel Zone Plate

Fang Jingyue Chang Shengli Qin Shiqiao Zhang Hailiang

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The capability of Fresnel zone plate (FZP) for light converging and splitting is calculated for normal incidence plane lights by using the Kirchhoff diffraction formula, and the results show that the capability of light converging and splitting capability is great for normal incident parallel light; the abaxial FZP's capability of light converging and splitting exceeds the whole FZP for the same area. The ZEMAX analyses show that the abaxial FZP's light converging and noise restraining ability is greater on condition that its area is bigger when it deviates the same distance from the FZP's center or the distance it deviates from the FZP's center is further when it has the same area. An optical antenna is proposed which is composed of FZP and Cassegrain telescope for atmospheric optical communication. It shows that the antenna can converge light and its noise restraining ability exceeds the paraboloid antenna.

Key words optical communications; optical antenna; Fresnel zone plate; Cassegrain telescope; abaxial Fresnel zone plate

1 引 言

自由大气紫外光通信技术的基本原理是把需要传输的信息加载到紫外光波上, 利用大气散射效应作为传输通道, 在接收端采用光学天线接收信号, 通过分光滤波等手段降低背景光噪声, 再利用光电探测元件将光信号转换为电信号, 进行解调及信息还原^[1]。接收滤光技术和光学天线技术是提高探测系统信噪比的关键。目前, 通常采用抛物面作为接收天线^[2,3]。利用 MODTRAN 计算得出的地表 200~

400 nm 太阳辐照度可知, 若选取 254 nm 作为工作波长^[4], 由于地表 300~400 nm 波段的辐照度相对 254 nm 强烈, 而光电探测元件对 300~400 nm 波段也有响应, 所以需要滤光措施降低该波段的干扰。同时大气分子和气溶胶粒子的吸收及散射, 引起光信号能量的衰减^[5], 所以需要光学天线增加接收的光信号强度。本文将对菲涅耳波带片(下文简称为波带片)进行分析, 并针对大气紫外光通信, 提出基于波带片和卡塞格伦望远镜的光学天线。

收稿日期: 2008-12-01; **收到修改稿日期**: 2009-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(60607013)资助课题。

作者简介: 方靖岳(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光电器件与测控、紫外通信等方面的研究。

E-mail: fjj_nudt@yahoo.com.cn

导师简介: 秦石乔(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电仪器、测控技术及光电精确制导技术等方面的研究。

E-mail: sqqin8@nudt.edu.cn

2 波带片的相关原理和公式

波带片是由一组透光与不透光的同心圆环交替间隔组成的特殊光栅,圆环半径满足

$$\rho_n = \sqrt{n\lambda f + n^2 \lambda^2 / 4}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots, N), \quad (1)$$

式中 ρ_n 为第 n 个圆环的半径, f 为波带片的主焦距。非单色平面光波垂直入射波带片时,由(1)式知, $f\lambda = f'\lambda' = \rho_n^2$, 不同光波的主焦距不同

$$f' = \lambda f / \lambda', \quad (2)$$

光波越长,其焦距越短,波带片具有分光作用。

运用平面屏幕衍射的基尔霍夫理论,由基尔霍夫衍射公式推导波带片的衍射光强^[6~9]

$$U_0(P_0) = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Sigma_1} \left\{ \frac{\partial U}{\partial n} \left[\frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \right] - U \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \right] \right\} ds, \quad (3)$$

式中 Σ_1 为波带片透光的圆环面积, r_{01} 为波带片上某点 P 到观察点 P_0 的距离, U 为波带片上光的复振幅分布, $U_0(P_0)$ 是光在观察点 P_0 的复振幅(如图 1 所示)。 P_0 点离 Σ_1 足够远,满足 $r_{01} \gg \lambda$, 于是 $k \ll 1/r_{01}$, 得

$$U_0(P_0) = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Sigma_1} \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \left(\frac{\partial U}{\partial n} - jkU \cos \varphi \right) ds. \quad (4)$$

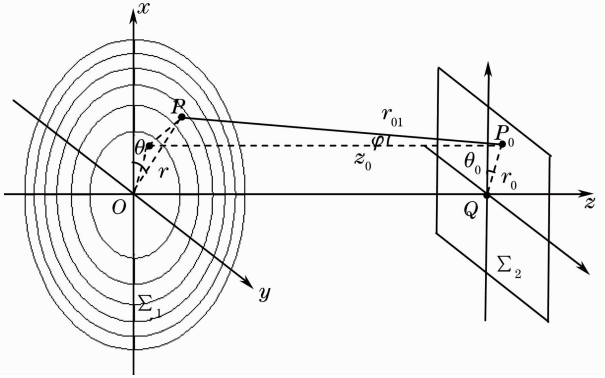


图 1 菲涅耳-基尔霍夫衍射示意图

Fig. 1 Sketch diagram of Fresnel-Kirchhoff diffraction

假设振幅为 A 的平面波以方向余弦 $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$ 入射波带片所在 xoy 平面, 则有

$$U = A \exp[jk(x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma)], \quad (5)$$

$$\frac{\partial U}{\partial n} = -jkU \cos \gamma,$$

在柱坐标系下,假设 Σ_1 面 $z = 0$, 并将(5)式代入(4)式得

$$U_0(r_0, \theta_0, z_0) = -\frac{jkA}{4\pi} \iint_{\Sigma_1} \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \times \exp[jk(x \cos \alpha + y \cos \beta)] (\cos \gamma + \cos \varphi) r dr d\theta, \quad (6)$$

式中 $r_{01}^2 = (r_0^2 + r^2 + z_0^2) - 2r_0 r \cos(\theta - \theta_0)$, $\cos \varphi = z_0/r_{01}$, $x = r \cos \theta$, $y = r \sin \theta$. 得观察点 $P_0(r_0, \theta_0, z_0)$ 处的衍射光强 $I(r_0, \theta_0, z_0) = |U_0(r_0, \theta_0, z_0)|^2$.

假设在波带片(位于 xoy 平面)上以 $G(a, 0, 0)$ 为圆心, 以 b 为半径截取一部分获得离轴波带片^[10](如图 2 所示), 则(6)式改写为

$$U_0(r_0, \theta_0, z_0) = -\frac{jkA}{4\pi} \iint_{\Sigma_1} \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \times \exp[jk(x \cos \alpha + y \cos \beta)] \text{circ}\left(\frac{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos \theta}}{b}\right) \times (\cos \gamma + \cos \varphi) r dr d\theta. \quad (7)$$

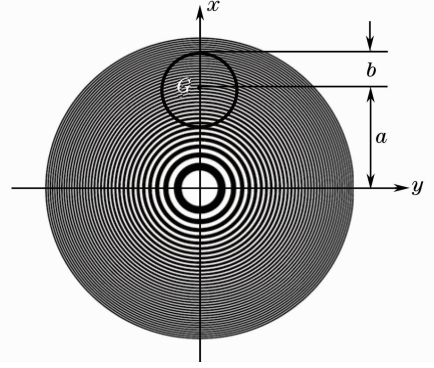


图 2 截取离轴波带片

Fig. 2 Intercepting abaxial Fresnel zone plate

下面讨论两种特例。1) 平面波垂直入射波带片时, $\cos \alpha = \cos \beta = 0$, $\cos \gamma = 1$, 则观察点 P_0 处的光波振幅为

$$U_0(r_0, \theta_0, z_0) = -\frac{jkA}{4\pi} \iint_{\Sigma_1} \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \times (1 + \cos \varphi) r dr d\theta, \quad (8)$$

当 $z_0 \gg r$, $z_0 \gg r_0$ 时, (8)式可简化为

$$U_0(r_0, \theta_0, z_0) = -\frac{jkA \exp\{jk[z_0 + r_0^2 / (2z_0)]\}}{2\pi z_0} \times \iint_{\Sigma_1} \exp\left\{\frac{jk}{2z_0} [r^2 - 2rr_0 \cos(\theta - \theta_0)]\right\} r dr d\theta. \quad (9)$$

2) 平面波传播方向平行于 xoz 平面, 与 x 轴的夹角为 α (如图 3 所示), 即 $\cos \beta = 0$, $\cos \gamma = \sin \alpha$, 则观察点 P_0 处的光波振幅为

$$U_0(r_0, \theta_0, z_0) = -\frac{jkA}{4\pi} \int_{\Sigma_1} \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \exp(jkr \cos \theta \cos \alpha) (\cos \gamma + \cos \varphi) r dr d\theta, \quad (10)$$

当 $z_0 \gg r, z_0 \gg r_0$ 时, 上式可简化为

$$U_0(r_0, \theta_0, z_0) = -\frac{jkA(1 + \cos \gamma) \exp\{jk[z_0 + r_0^2/(2z_0)]\}}{4\pi z_0} \times \int_{\Sigma_1} \int \exp\left\{jk\left[r \cos \alpha \cos \theta + \frac{r^2 - 2rr_0 \cos(\theta - \theta_0)}{2z_0}\right]\right\} r dr d\theta. \quad (11)$$

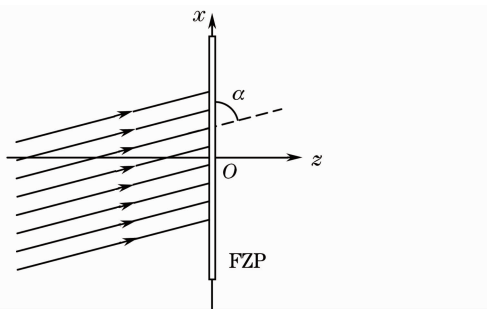


图 3 平面波与 x 轴成 α 角入射波带片

Fig. 3 Plane wave enters the Fresnel zone plate at an angle of α

3 对波带片的模拟与分析

以 $\lambda_1 = 254 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 300 \text{ nm}$ 和 $\lambda_3 = 400 \text{ nm}$ 三种光波作为讨论对象。假设波带片的参考波长 $\lambda_1 = 254 \text{ nm}$, 主焦距 $f_1 = 20 \text{ cm}$, 半波带数 $n = 4000$, 透光的半波带数 $N = 2000$, 此时, 波带片的最外环半径为 $R_{4000} \approx 1.43 \text{ cm}$ 。若单位振幅平面光波垂直入射波带片, 根据(8)式, 利用 MATLAB 模拟计算得到如图 4 和图 5 所示的结果。

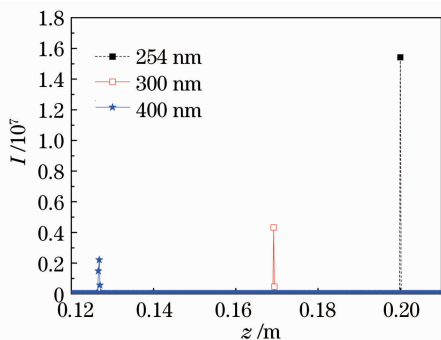


图 4 垂直入射波带片时的轴向光强分布

Fig. 4 Axial intensity distribution with incident angle $\alpha = 0$

图 4 所示三种光波各自在不同位置聚焦光, 这是因为波带片具有分光作用, 由(2)式得: $f_2 = 0.169 \text{ m}$, $f_3 = 0.127 \text{ m}$, 光波越长, 其焦距越短。图 5 所示主焦点处光强 $I_1 \approx 1.6 \times 10^7$, 这是因为菲涅耳半波带任何相邻两带的对应部分所发出的次波到达主焦点时的光程差为 $\lambda_1/2$, 对于单位振幅平面光而言, 不用波带

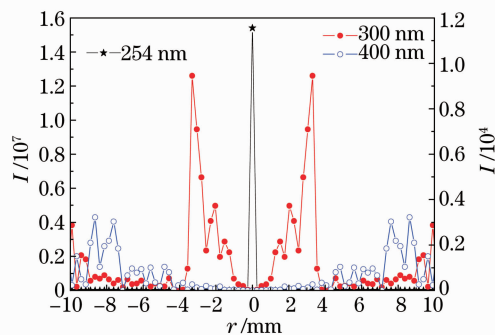


图 5 垂直入射波带片时主焦点横向光强分布

Fig. 5 Transverse intensity distribution of main focal plane with $\alpha = 0$

片或任何光阑时 ($N \rightarrow \infty$), 主焦点的合振幅为 $A_\infty = a_1/2$, 若只让奇数半波带透光, 则主焦点处的合振幅为 $A_N \approx N \times 2A_\infty = 2000a_1$, 从而 $I_N = 4N^2 I_\infty \approx 1.6 \times 10^7 I_\infty$ 。由于波带片的光学作用, 主焦点 ($z = f_1$) 上的光强 I_2 和 I_3 相比 I_1 非常小。

由(2)式知, 波带片具有分光的作用, 不同光波会聚在不同位置, 从而可以降低参考光波焦点处的背景噪声。若半波带数 $n = 62800$, 透光的半波带数 $N = 31400$, 此时, 波带片最外环半径为 $R_{62800} \approx 5.7 \text{ cm}$ 。假设 $a = 3R_{62800}/4$, $b = R_{62800}/4$, 由(7)式计算得图 6 所示结果。虽然 $b \approx R_{4000}$, 但图 6 和图 7 所示主焦点上的各个光波的光强分布并不相同, 通过离轴波带片后主焦点上的光强相对于通过相同面积的对称波带片后主焦点上的光强要小。但是, 对于离轴情况 $I_1/I_{2,3} \approx 10^7$, 而对于对称波带片 $I_1/I_{2,3} \approx 10^3$, 所以离轴波带片相对于相同面积的对称波带片对参考光波的聚集能力更为突出, 使用离轴波带片能获得更加干净的背景。图 7 所示即为 $b = R_{62800}/4$, $a = 0$ 和 $b = R_{62800}/4$, $a = 3R_{62800}/4$ 两种情况下, 200~400 nm 波段光波通过离轴波带片和具有相同面积的对称波带片后主焦点上光强的谱分布。可见, 离轴波带片相比于对称波带片具有更好的抑噪性能。

根据(1)式有

$$\Delta \rho_n = \rho_{n+1} - \rho_n = \frac{\lambda f + \lambda^2/4 + n\lambda^2/2}{\rho_{n+1} + \rho_n} <$$

$$\frac{\lambda f + \lambda^2/4 + n\lambda^2/2}{2\rho_n} \quad (12)$$

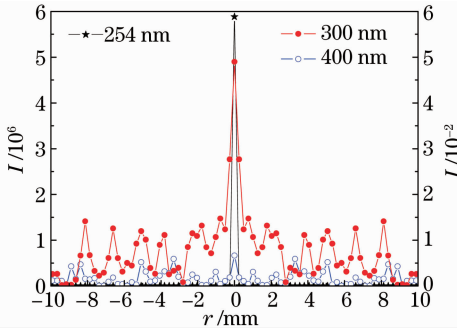


图 6 垂直入射离轴波带片时主焦面横向光强分布

Fig. 6 Transverse intensity distribution of main focal plane when light inject abaxial zone plate at $\alpha=0$

目前,最好的波带片最外环线宽已经达到 $19 \text{ nm}^{[11]}$,假设参考光波长 $\lambda_1 = 254 \text{ nm}$,根据波带片的加工水平,若 $\Delta\rho_n \geq 150 \text{ nm}$,当主焦距 $f_1 = 1 \text{ cm}$ 时,由(12)式可知 $n_{\max} = 69234$,此时波带片的最外环半径 $R \approx 1.591 \text{ cm}$;假设主焦距 $f_1 = 10 \text{ cm}$,则 $n_{\max} = 692333, R \approx 15.911 \text{ cm}$ 。

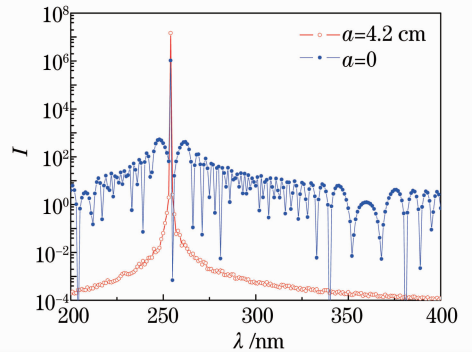


图 7 主焦点光强的谱分布

Fig. 7 Spectrum of the main focus intensity

取主焦距 $f_1 = 10 \text{ cm}$,半波带数 $n = 200$,透光的半波带数 $N = 100$,则波带片的最外环半径 $R \approx 2.25 \text{ mm}$,利用 ZEMAX 进行模拟计算得到如图 8 所示的结果。

图 9 所示为三种光波通过离轴位置相同、尺寸不同(a 相同且为 1 mm , b 取不同值)而截取的离轴波带片时,主焦面上的光强分布。由此可见: 1) 离轴波带片的半径越大,对光波的聚集能力越

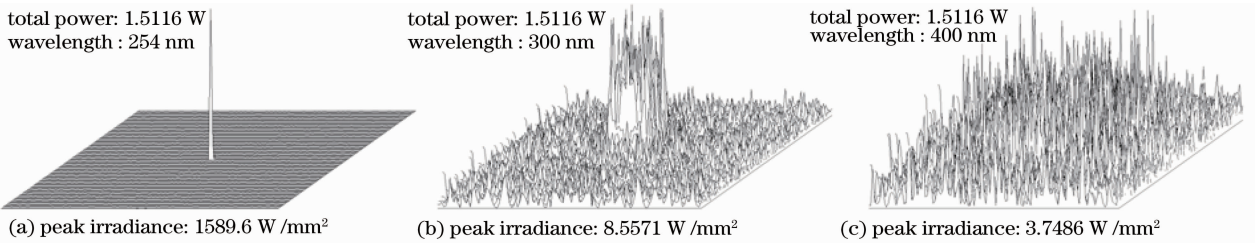


图 8 垂直入射波带片时主焦面的光强分布

Fig. 8 Irradiance distribution of main focal plane when light enter zone plane with $\alpha=0$

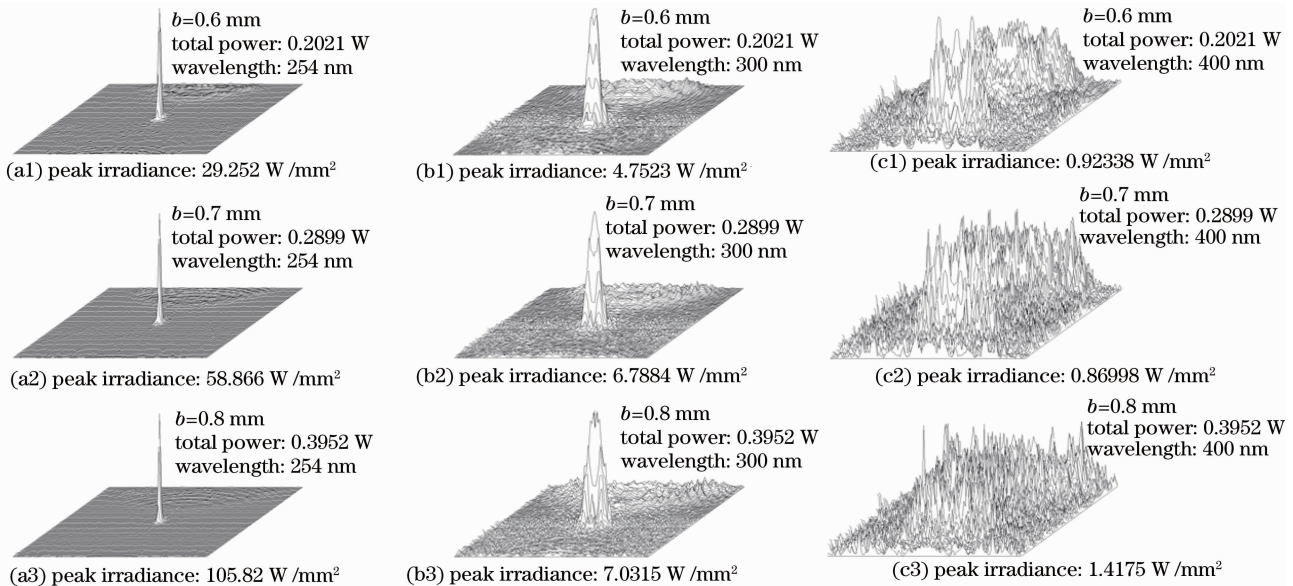


图 9 垂直入射不同波带片时主焦面的光强分布

Fig. 9 Irradiance distribution of main focal plane when light inter different abaxial zone plane with $\alpha=0$

强;2)离轴波带片的半径越大,对参考光波 λ_1 的聚集能力相对 λ_2 和 λ_3 越突出。

图 10 所示为三种光波通过尺寸大小相同、离轴位置不同(b 相同且为 0.5 mm, a 取不同值)而截取

的离轴波带片时,主焦面上的光强分布。由此可见:1)离轴波带片对中心偏离越远,对光波的聚集能力越弱;2)离轴波带片对中心偏离越远,对参考光波 λ_1 的聚集能力相对 λ_2 和 λ_3 越差。

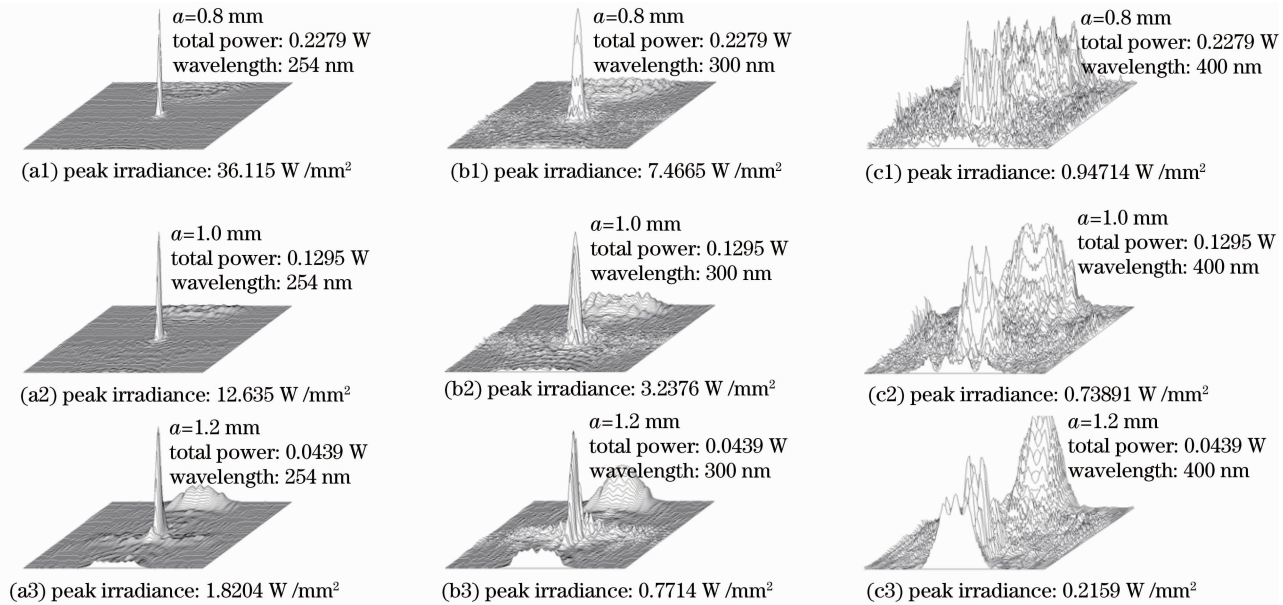


图 10 垂直入射不同波带片时主焦面的光强分布

Fig. 10 Irradiance distribution of main focal plane when light enter different zone plate with $\alpha=0$

4 光学天线方案

图 11 所示为光线入射卡塞格伦(Cassegrain)望远镜,其参数为主镜: $k_m = -1, r_m = 200$ cm;副镜: $k_s = -1.5625, r_s = 22.5$ cm;主副镜间距 90 cm。角度从 $0 \sim 0.06^\circ$ 变化时,半径为 1 cm 的探测元件上的光斑分布。当入射角为 0.06° 时,光线已无法完

全到达探测元件,可见卡塞格伦望远镜视场角很小。若忽略副镜对入射光线的阻挡,则卡塞格伦望远镜的光学增益为 $G \approx (r_m/r_d)^2$ (r_m 是主镜顶点曲率半径, r_d 是探测元件半径)^[12]。卡塞格伦望远镜具有小视场高增益的特点。

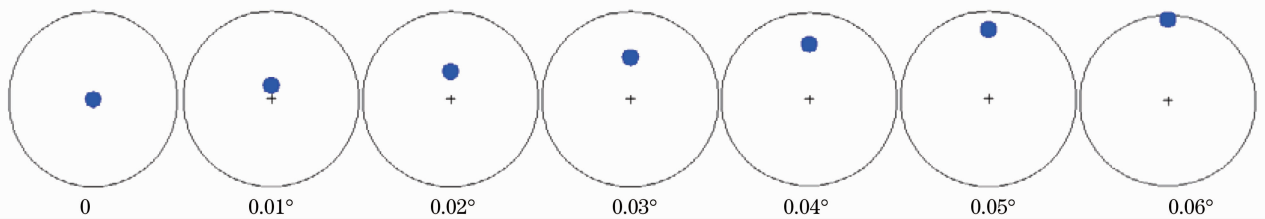


图 11 探测器上光线会聚点随光线入射角度的变化

Fig. 11 Variation of convergent points of ray with different incident angles

通过以上计算和分析知道,波带片对垂直入射的平行光具有强大的会聚及分光能力,离轴波带片对垂直入射光波同样具有强大的会聚能力,且分光更加彻底;卡塞格伦望远镜系统具有小视场高增益特点,常用于激光通信系统。如果将卡塞格伦望远镜系统与波带片相结合组成如图 12 所示的光学天线(下文称组合天线),将波带片置于望远镜出射孔

径上,调整卡塞格伦望远镜系统副镜与主镜的距离,能使光线经副镜反射后,以平行光形式垂直入射波带片,那么就可以充分利用望远镜小视场高增益和波带片高会聚及分光的作用,提高信号光强度并降低背景光干扰。

利用 ZEMAX 进行模拟计算,设置主镜为抛物面:顶点曲率半径 $r_m = 20$ cm,焦距 $f_m = 10$ cm,圆锥

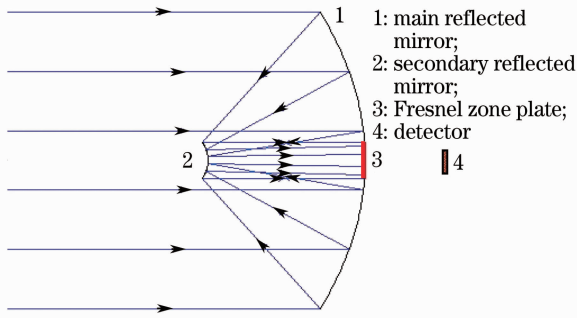


图 12 基于波带片的光学天线

Fig. 12 Optical antenna based on Fresnel zone plate

系数 $k_m = -1$, 尺寸半径 $r_{m_size} = 20$ mm; 副镜为双曲面: 顶点曲率半径 $r_s = 22.5$ mm, 焦距 $f_s = 10$ mm,

圆锥系数 $k_s = -1.5625$ 。当设置主镜和副镜的间距为经验值 88.728 mm 时, 经副镜射向主镜通光孔径的光线近似为平行光。若主镜的通光孔径 $r_{m_ap} = 2.254$ mm, 将参考光波长 $\lambda_1 = 254$ nm, 主焦距 $f_1 = 10$ cm 的对称波带片置于通光孔径上, 探测平面位于波带片焦平面, 计算得图 13 所示探测平面的光强分布。与图 8 所示结果相比较可见, 相同面积的对称波带片, 与 Cassegrain 组合时对光波的聚集能力比单独使用时对光波的聚集能力要强。这是因为主镜具有较大的受光面积, 进入主镜有效视场的光线通过副镜向波带片进行了转移。根据前面得出的结论, 若在主镜的通光孔径处放置离轴波带片, 天线的抑噪性能将更为突出。

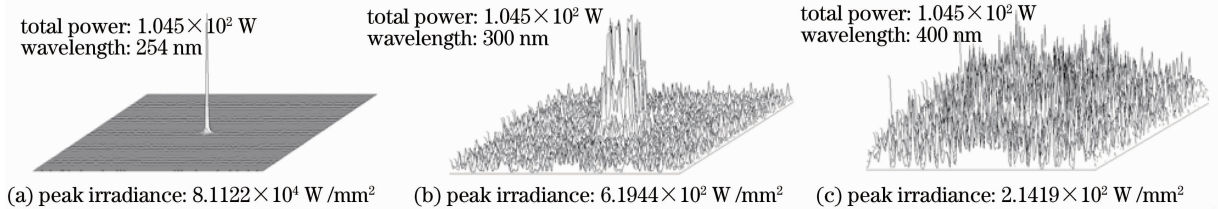


图 13 垂直入射组合天线时探测平面的光强分布

Fig. 13 Irradiance distribution of probe plane when light enter composed antenna in normal incidence

对于抛物面天线, 设置顶点曲率半径 $r_{par} = 10$ mm, 焦距 $f_{par} = 5$ mm, 尺寸半径 $r_{par_size} = 20$ mm, 利用 ZEMAX 模拟得到如图 14 所示的焦平面光强分布。组合天线和抛物面天线具有相同的入瞳大小, 在探测平面的光强分布分别如图 13 和图 14 所示, 通过比较两者的峰值辐照度及总功率可见, 利用抛物面天线得到的峰值辐照度以及总功率较组合天

线都大, 但是, 组合天线比抛物面天线具有更高的抑噪效果。这是因为, 抛物面能将入射光会聚到唯一的焦点上, 波带片在利用光通量上却存在缺陷, 它只让偶数或者奇数半波带通光, 就使入射光的光通量损失了一半, 它又存在一系列的焦点, 也是对光能量的一种浪费。而波带片所具有的系列焦点又使得组合天线比抛物面天线具有更好的抑噪性能。

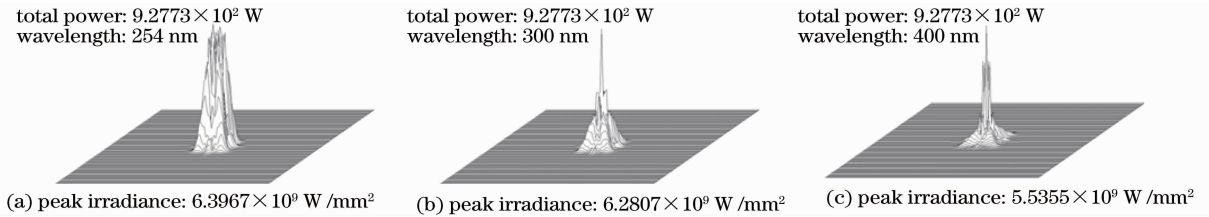


图 14 垂直入射抛物面天线时探测平面的光强分布

Fig. 14 Irradiance distribution of probe plane when light enter paraboloid antenna in normal incidence

4 结 论

波带片适合应用在长程光通信、卫星激光通讯和宇航器对太阳能的采集等领域, 本文根据波带片和卡塞格伦望远镜的特点, 提出了将两者结合组成光学天线的方案。它利用望远镜小视场高增益的特点和波带片会聚及分光的作用, 提高信号光强度并降低背景噪声。但是, 由于波带片对一种波长的光有多个焦点, 这不利于对光通量的充分利用, 可以考

虑应用相位型波带片。波带片是该光学天线的关键器件, 其加工水平直接影响其应用, 有报道称^[13~16], 中国科学院微电子研究所在国家同步辐射实验室光刻站上利用 X 射线光刻技术成功研制出最外环宽度为 150 nm 的高线密度钛特征线微聚焦波带片。通过合理选择参考光波长和主焦距, 能加工出符合实际工作要求的波带片。本文为大气散射光通信光学天线的设计提供了参考依据。

参 考 文 献

- 1 Jia Honghui, Chang Shengli, Yang Jiankun *et al.*. Monte carlo simulation of atmospheric transmission characteristics in non-line-of-sight ultraviolet communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 955~960
贾红辉, 常胜利, 杨建坤等. 非视线紫外通信大气传输特性的蒙特卡罗模拟[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 955~960
- 2 Fang Jingyue, Zhang Hailiang, Jia Honghui *et al.*. Optical antenna for non-line-of-sight scattering atmospheric optical communication[J]. *J. Applied Optics*, 2008, **29**(2): 198~202
方靖岳, 张海良, 贾红辉等. 非视线散射大气光通信的光学天线[J]. *应用光学*, 2008, **29**(2): 198~202
- 3 Yang Changqi, Jiang Wenhan, Rao Changhui. Impact of aperture averaging on bit-error rate for free-space optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 212~218
杨昌旗, 姜文汉, 饶长辉. 孔径平均对自由空间光通信误码率的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 212~218
- 4 Fang Jingyue, Jia Honghui, Yin Hongwei *et al.*. Discussion of the working wavelength for UV communication[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, **4**(5): 76~80
方靖岳, 贾红辉, 尹红伟等. 紫外光通信工作波段的讨论[J]. *光学与光电技术*, 2006, **4**(5): 76~80
- 5 Chen Junhong, Yang Xiaoli. Research of the atmospheric factors of solar blind ultraviolet communication [J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(4): 38~39
陈君洪, 杨小丽. 非视线“日盲”紫外通信的大气因素研究[J]. *激光杂志*, 2008, **29**(4): 38~39
- 6 Wang Zhiguo, Cao Xia, Xia Yuxing. Calculation of diffraction intensity of zone plate on misfocus condition[J]. *J. Shanghai Jiaotong University*, 2000, **34**(8): 1112~1114
王治国, 曹霞, 夏宇兴. 离焦情况下波带片衍射光强的数值计算[J]. *上海交通大学学报*, 2000, **34**(8): 1112~1114
- 7 Fu Wenyu, Liu Zhengqi. Numerical simulation for the diffraction properties of laser zone-plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1756~1760
付文羽, 刘正岐. 激光波带片衍射性质的数值模拟[J]. *光子学报*, 2006, **35**(11): 1756~1760
- 8 He Xiaorong, Zhang Weiping. Bi-grating imaging analysis by fresnel diffraction theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1371~1376
何小荣, 张卫平. 用菲涅耳衍射理论分析双光栅成像效应[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1371~1376
- 9 Guo Chengshan, Li Chuantao, Hong Zhengping *et al.*. Suitability of different sampling methods for digital simulations of the optical diffraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 442~446
国承山, 李传涛, 洪正平等. 光衍射数值模拟中不同抽样方法的适用性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 442~446
- 10 Ji Xianming, Mu Renwang, Han Liangkai. A binary Fresnel lens used as light splitting element[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(6): 4~7
纪宪明, 沐仁旺, 韩良恺. 可用作分光元件的二元菲涅耳透镜[J]. *光电工程*, 2003, **30**(6): 4~7
- 11 Wang Kaige, Wang Lei, Niu Hanben. Microfocal X-ray source and X-ray optical elements[J]. *J. Applied Optics*, 2008, **29**(2): 183~191
王凯歌, 王雷, 牛憨笨. 微束斑 X 射线源及 X 射线光学元件[J]. *应用光学*, 2008, **29**(2): 183~191
- 12 Jin Wei, Zhang Haitao, Gong Mali *et al.*. A wide-fov nonimaging concentrator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(12): 1518~1523
金伟, 张海涛, 巩马理等. 漫射光宽视场光学天线的设计[J]. *光子学报*, 2002, **31**(12): 1518~1523
- 13 Xiao Kai, Liu Ying, Xu Xiangdong *et al.*. Fabrication of soft X-ray phase condenser zone plates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1722~1723
肖凯, 刘颖, 徐向东等. 软 X 射线相位型聚焦波带片的研制[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1722~1723
- 14 Wang Deqiang, Cao Leifeng, Xie Changqing *et al.*. Fabrication of micro zone plates by E-beam and X-ray Lithography[J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2006, **27**(6): 1147~1150
王德强, 曹磊峰, 谢常青等. 电子束和 X 射线光刻制作高分辨率微波波带片[J]. *半导体学报*, 2006, **27**(6): 1147~1150
- 15 Chen Jie, Liu Longhua, Liu Gang *et al.*. X-ray imaging Fresnel zone plates and fabrication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(12): 1894~1899
陈洁, 柳龙华, 刘刚等. X 射线成像波带片及制作[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(12): 1894~1899
- 16 Fan Dongsheng, Wang Deqiang, Kang Xiaohui *et al.*. Study on zone plate replication using hot embossing lithography technology [J]. *Microfabrication Technology*, 2005, (3): 27~30
范东升, 王德强, 康晓辉等. 热压印光刻技术复制波带片图形研究[J]. *微细加工技术*, 2005, (3): 27~30